

Estimation quantitative des paléotempératures hivernales en Alsace depuis 340 000 ans à partir de l'analyse des associations malacologiques

Denis-Didier ROUSSEAU

Résumé — L'estimation des paléotempératures fait l'objet de nombreuses recherches tant en milieu marin que continental. Nombreux sont les organismes analysés de cette manière. Curieusement, en milieu continental, les seules études paléoclimatologiques ne concernent que les pollens, les cernes des arbres et les insectes. La méthode proposée présente les premiers résultats de l'estimation des paléotempératures réalisées à partir de l'analyse des populations de mollusques terrestres qui souvent sont les seuls restes biologiques conservés dans les sédiments quaternaires loessiques.

Quantitative winter paleotemperature estimate over the last 340,000 years obtained from mollusc analyses in Alsace (France)

Abstract — Temperature estimations have been thoroughly studied in marine and continental deposits. Numerous organisms support such analyses: pollens, foraminifera, diatoms, wood ridges, insects. In continental deposits, only plants and insects are concerned by paleotemperatures, while terrestrial molluscs are often well-preserved in Quaternary series. The method proposed here shows the first results of temperature estimates obtained from the molluscs of Achenheim, loess sequence in Alsace, which have been well-preserved and recorded over the last three climatic cycles.

Abridged English Version — The purpose of this paper is to present a new method for quantitative estimation of climatic parameters. The goal of paleoclimatic studies is to reconstruct past climates in order to predict their future evolution. In continental and marine Quaternary sediments, estimations of climatic parameters have been defined by the transfer functions since the pioneer work of Imbrie and Kipp [1]. Several groups have already been used: foraminifera, coccoliths, diatoms, pollens, insects, as well as tree rings ([2] to [8]). In continental deposits, terrestrial molluscs are also good environmental indices and are generally numerous and well-preserved. In loess deposits, for example, they are the only biological remains still existing in large quantities.

Up to now, semi-quantitative estimations of climatic parameters have been made using correspondence analysis (Fig. 11). The results, interpreted as soil surface climate, show variations in thermal and hygrometric factors over time [9]. They are significant and in agreement with other environmental indices. This is why their pertinence and precision allow quantifying climatic parameters using analog methods.

THE DATA. — Middle and Upper Pleistocene malacological assemblages of north western Europe are strictly identical to those which can be sampled today in the same zones. Also as molluscs are characteristic of the environments where they exist, they facilitate the search for a reliable reference. Recent assemblages (77) come from samples from France and Scandinavia (Abisko park, North Sweden). Current February temperatures are obtained from the meteorological stations close to the sampling sites. One hundred and one taxa, specifically determined, have been considered as variables in the over all table here. Fossil assemblages come from Achenheim sections where the last five climatic cycles (*sensu* Kukla) have been analyzed. As the last three have been well-preserved and roughly continuous

Note présentée par Yves COPPENS.

over the last 339,000 years, transfer functions have been developed for the 123 assemblages recorded there.

THE MATHEMATICAL METHOD. — This analysis (*Fig. 1, II*) is based on coded recent (Da) and fossil (Df) [9] data (values varying between 0 and 12) which constitute an homogeneous table (D). The multivariate analysis used is a correspondence method. Initial analysis allows ruling out species which do not contribute to the variability of the entire set. These taxa are excluded from the table and a new analysis has been performed (Step 1). Factors which the cumulative sum equals 90% of the total variance are selected for Step 2 (*Fig. 1*). Stepwise regressions are carried out via loadings of the recent assemblages to estimate current climatic parameters, varying the thresholds of the F test to enter and to remove. The accepted coefficients correspond to the analysis which provides the highest multiple correlation coefficient and the lowest standard error. Estimates of recent climatic parameters P'a (Step 2) are tested by analysis of residuals (Step 3), which allows accepting or to rejecting the transfer functions (*Fig. 1*). Then, the final step (Step 4) is to estimate fossil climatic parameters (P'f) applying the transfer functions to loadings of the fossil assemblages on the selected factor of correspondence analysis (*Fig. 1*).

FEBRUARY TEMPERATURES ESTIMATES. — The application of this, method on Achenheim assemblages allowed reconstructing February temperatures over the last 339,000 years (*Fig. 2*). Values are given with a confidence interval of 2.09°C ($P'f \pm \sigma$; $\sigma = 1.045^{\circ}\text{C}$). First, temperature estimates are roughly lower than current values (1.8°C), except for the Holocene and during stage 9 or higher in stage 7 (*Fig. 2*). Minima reach -12°C during stages 2 and 8. It is surprizing to see that during stage 6, pleniglacial temperatures are not lower. They vary around -5°C . Such a result is not in agreement with the continental ice volume determined by analyses of $\delta^{18}\text{O}$.

These values determined for February are in relative agreement with the literature, especially for the last climatic cycle ([10], [11]). The method proposed should be developed in two ways: (1) extension to August and yearly temperatures and precipitations, (2) extension of the present day referential for a better evaluation of fossil parameters. Without doubt, these paths of research, which are really new, have a good future and will provide useful results for the test of long-time modelling of climate. Also, as loess sequences have often recorded more than one climatic cycle, climatic estimates from molluscs will be fundamental elements for continental and oceanic comparisons over the long term.

I. INTRODUCTION. — La démarche paléoclimatologique a pour but de reconstruire les climats passés et de tenter de prédire leur évolution future. Pour ce faire les modélisations nécessitent des données estimées des paramètres climatiques tels que températures, et précipitations en milieu continental. C'est donc dans ce but que de nombreuses études ont été réalisées depuis la première publication d'Imbrie et Kipp [1] dans laquelle furent établies les premières « fonctions de transfert ». Le matériel analysé selon ces méthodes est relativement limité : foraminifères, coccolithes, diatomées, pollens et insectes ([2] à [7]). Tous ces organismes sont de remarquables indicateurs du milieu dans lequel ils vivent et sont généralement conservés en grand nombre dans les sédiments quaternaires. Des applications similaires ont également été employées en dendroclimatologie [8].

En milieu continental les mollusques terrestres constituent également des indices environnementaux fiables et sont souvent abondants dans les sédiments. Parfois, comme dans certaines séries loessiques, ils représentent le seul reste biologique conservé.

Jusqu'à présent l'estimation des paramètres climatiques par les mollusques continentaux a été abordée d'une manière semi-quantitative (fig. 1,I) par l'analyse factorielle des associations rencontrées dans les séquences sédimentaires [9]. Les résultats obtenus caractérisent les variations du facteur thermique, comparables à celles enregistrées par le $\delta^{18}\text{O}$ dans les sondages océaniques, et celles de l'humidité [9]. Ces résultats, interprétés comme représentatifs du climat au sol (fig. 1,I), peuvent être assimilés aux « Paléobioclimats » déterminés par J. Guiot [6]. Leur pertinence et leur précision autorisent une quantification des paramètres climatiques par le principe des analogues, méthode jusqu'à présent non employée sur ce matériel.

II. LES DONNÉES. — Toutes les méthodes utilisées pour estimer les paramètres climatiques procèdent à partir des données actuelles. En milieu continental, des réserves ont été émises à propos d'une stricte application du principe actualiste [10] : les environnements fossiles ont-ils tous des représentants actuels ? Quelle est la part du microclimat sur les assemblages tels qu'ils sont conservés ? Quelle est la part du facteur historique sur la composition même de l'assemblage ?

Les associations malacologiques d'âge Pléistocène moyen et supérieur sont en France septentrionale rigoureusement identiques à celles que l'on peut rencontrer de nos jours en Europe occidentale. Les mollusques sont des organismes bien adaptés à leur environnement qui, si celui-ci est stable, ne se déplacent que très peu. Dans ces conditions, la malacofaune prélevée en un lieu déterminé est alors représentative des conditions de ce milieu : végétation, température, humidité, précipitations. Une telle opportunité facilite la recherche d'un référentiel fiable. De plus, l'analyse dans une seule séquence pondère l'interaction microclimat-climat général [9].

77 assemblages actuels ont été réunis pour constituer le référentiel : 52 proviennent de prélèvements effectués en Suède dans le Parc naturel d'Abisko et 23 en forêt en Bourgogne. 101 taxons, déterminés spécifiquement, sont retenus comme variables. Les températures moyennes annuelles de février ont été obtenues à partir des données provenant des stations météorologiques à proximité desquelles les prélèvements ont été réalisés.

Les assemblages fossiles proviennent du gisement d'Achenheim dans lequel parmi les cinq derniers cycles reconnus, soit les 500 000 dernières années, les trois derniers (339 000 ans) sont parfaitement conservés (soit 123 associations malacologiques assimilées aux niveaux stratigraphiques qui les renferment).

III. ANALYSE MATHÉMATIQUE (fig. 1). — Les données issues des comptages sont codées par classes d'abondance selon un logarithme de base 2 [9]. Les valeurs codées sont ainsi comprises entre 0 et 12 et constituent un tableau de données homogène (D).

Étape 1 : recherche des Analogues (fig. 1,II). — Une première analyse factorielle des correspondances permet de rejeter les variables (espèces) qui ne contribuent pas à la variabilité de l'échantillon global. Si chaque taxon V influe identiquement sur l'échantillon, sa contribution théorique doit être égale à $1/p$, p étant le nombre total de variables. En conséquence, tout taxon ayant une contribution inférieure au seuil théorique doit être rejeté. Dans la première analyse, la sélection des variables est effectuée à partir des sept premiers facteurs qui expriment 44,8 % de la variance totale. 49 espèces ont été retenues pour la deuxième analyse : *Acanthinula aculeata*, *Aegopinella nitidula*, *Arianta*

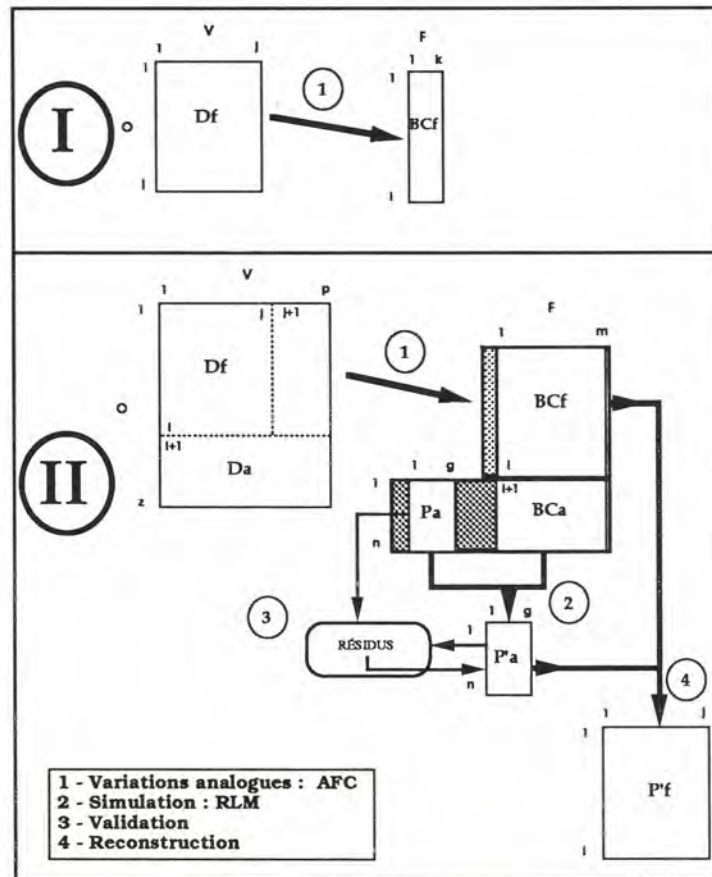


Fig. 1. — Schéma de la méthode utilisée pour l'analyse des associations malacologiques. I, Détermination des paléo « bioclimats » BCf: estimation semi-quantitative des paramètres climatiques et environnementaux. II, Estimation quantitative des paramètres climatiques par régression linéaire multiple. Quatre étapes sont matérialisées. 1, Détermination des bioclimats (facteurs expliquant 90 % de la variance totale); 2, Simulation des paramètres climatiques actuels par régressions pas à pas; 3, Validation des équations par l'analyse des résidus; 4, Estimation des paramètres climatiques fossiles (P'f). (Df-a, tableau des données fossiles-actuelles codées. BCf bioclimats fossiles, BCa bioclimats actuels, Pa paramètres climatiques actuels, P'a estimations des paramètres climatiques actuels, P'f estimations des paramètres climatiques fossiles).

Fig. 1. — Sketch of the method applied to terrestrial molluscs. I, Determination of the paleo "bioclimates" BCf: semi-quantitative estimation of climatic and environmental parameters. II, Quantitative estimation of climatic parameters estimation using multiple linear regression. Four steps are indicated. 1, Bioclimates determination (factors explaining 90% of the total variance); 2, Simulating of recent climatic parameters by stepwise regressions; 3, Agreement of the equations by the analysis of residuals; 4, Fossil climatic parameters estimates (Df fossil data, Da present day data, BCf fossil bioclimates, BCa present day bioclimates. Pa, present day climatic parameters, P'a estimated present day climatic parameters, P'f estimated climatic parameters).

arbustorum, *Bradybaena fruticum*, *Catinella arenaria*, *Clausilia bidentata*, *Chondrula tri-dens*, *Cochlicopa lubrica*, *Cochlostoma septemspirale*, *Columella columella*, *C. endentula*, *Deroceras agreste*, *Discus rotundatus*, *D. ruderatus*, *Eucobresia nivalis*, *Euconulus alderi*, *E. fulvus*, *Helicella sp.*, *Helicigona lapicida*, *Helicodonta obvoluta*, *Limax sp.*, *Nesovitrea petronella*, *Orcula doliolum*, *Oxyloma sarsi*, *Pomatia elegans*, *Punctum pygmaeum*, *Pupilla alpicola*, *P. muscorum*, *Succinea oblonga*, *S. putris*, *Succinea sp.*, *Vallonia costata*, *V. pulchella*, *V. tenuilabris*, *Vertigo alpestris*, *V. arctica*, *V. genesii*, *V. geyeri*, *V. lilljeborgi*,

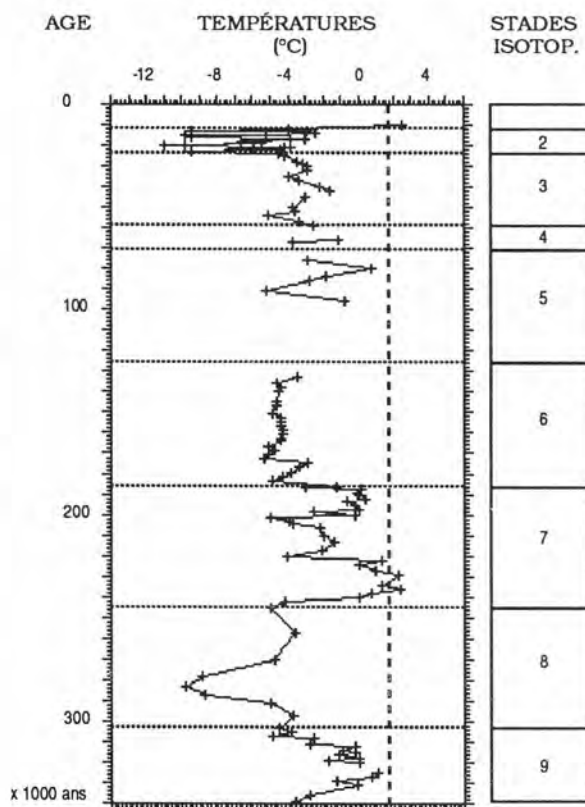


Fig. 2. — Reconstruction des variations de la température moyenne de février (°C) pour les derniers 339 000 ans. La moyenne actuelle pour février à Strasbourg (station de référence) est de 1,8°C (trait vertical).

Fig. 2. — Variations of the monthly estimated temperatures of February (°C) for the last 339,000 years. 1.8°C is the mean present time temperature of February (vertical line) in Strasbourg (recent reference meteorological station).

V. modesta, *V. parcedentata*, *V. pygmaea*, *V. ronneyensis*, *Vertigo* sp., *Vitrea contracta*, *V. crystallina*, *V. subrimata*, *Vitrina pellucida* et *Zoogenetes harpa*.

Une deuxième analyse est réalisée sur le nouveau tableau. La variabilité générale de l'échantillon est approchée en retenant les premiers facteurs (tableau BC) dont la somme cumulée des pourcentages de variance exprimée est égale à 90 (90 % de l'information accessible — 24 facteurs retenus dans l'analyse présentée ici).

Étapes 2 et 3 : Simulations (fig. 1,II). — Les simulations des paramètres climatiques actuels (Pa) sont réalisées par régressions linéaires multiples pas à pas de leurs valeurs réelles en fonction des projections des associations de référence sur les 24 premiers facteurs. Plusieurs analyses sont effectuées en faisant varier les seuils de rejet ou d'acceptation de l'hypothèse nulle (indépendance du paramètre climatique par rapport aux scores factoriels de l'analyse multivariée). Les coefficients retenus, correspondent à l'analyse pour laquelle le coefficient de corrélation multiple est le plus élevé pour une erreur standard la plus faible. L'étude des résidus, valeurs réelles (Pa) — valeurs estimées (P'a), permet d'accepter ou de rejeter les résultats obtenus.

Étape 4 : Reconstructions (fig. 1,II). — Les estimations des paramètres climatiques fossiles (P'f) sont alors calculées en appliquant les équations des régressions linéaires multiples, déterminées pour le référentiel, aux projections des assemblages fossiles sur les axes factoriels retenus.

IV. PALÉOTEMPÉRATURES HIVERNALES D'ACHENHEIM. — Les reconstructions quantitatives obtenues sont présentées par comparaison avec la moyenne actuelle de février (1,8°C)

pour la station météorologique de référence la plus proche d'Achenheim : Strasbourg (fig. 2).

Excepté pour le sommet de la séquence et certains niveaux appartenant au stade isotopique 7, les valeurs calculées indiquent un déficit par rapport à l'actuel (fig. 2). Durant les stades isotopiques 5 et 9, la température hivernale est par contre relativement proche de l'actuel (fig. 2). Pendant les phases correspondant à un climat pléni-glaciaire, stades isotopiques 2, 3, 4, 6, 8, les températures estimées sont très nettement inférieures à la valeur de référence, les minimums approchant -12°C (fig. 2). Un adoucissement est enregistré dans la courbe hivernale durant le stade 6 et correspond à une température relativement proche de 0°C (fig. 2).

Trois faits majeurs sont ainsi mis en évidence : (1) dans toute la séquence, les températures minimales sont observées durant le stade 2, avec un système oscillant complexe (fig. 2) déjà reconnu précédemment [9]; (2) le stade 6 présente des minima moins importants qu'au stade 2 (fig. 2) et surtout (3) le stade 8 indique un minimum essentiellement vers $-280\,000$ ans : la température hivernale estimée est proche de -12°C de 285 à 275 000 ans puis elle traduit par la suite un adoucissement relatif, les valeurs étant comprises entre -5 et -3°C (fig. 2).

En conclusion, ces valeurs déterminées pour le mois de février sont en relative concordance avec les données déjà publiées, principalement pour le dernier cycle climatique. Elles sont fournies avec un intervalle de confiance de $2,09^{\circ}\text{C}$ ($Pf \pm \sigma$; $\sigma = 1,045^{\circ}\text{C}$). La méthode proposée, bien que différente de celles déjà employées, apporte des informations comparables aux résultats sur d'autres organismes pour les stades 2, 3, 4, 5 [11] et nouvelles pour les cycles antérieurs 6, 7, 8, 9. L'exploitation de cette méthode doit être poussée dans deux directions : (1) extension des estimations aux températures et aux précipitations moyennes mensuelles d'août et annuelles, (2) extension du référentiel actuel pour une meilleure appréciation des paramètres fossiles.

Note remise le 30 août 1989, acceptée après révision le 9 octobre 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] IMBRIE et N. KIPP, in K. K. TUREKIAN éd., *Yale Univ. Press*, New Haven, 1971, p. 71-181.
- [2] T. WEBB et D. R. CLARK, *Ann. New York Acad. Sci.*, 288, 1977, p. 93-118.
- [3] K. R. GEITZENAUER, M. ROCHE et A. MCINTYRE, in R. M. CLINE et J. D. HAYS éd., *Geol. Soc. Am. Mem.*, 145, 1976, p. 423-448.
- [4] J. J. PICHON, M. LABRACHERIE, L. D. LABEYRIE et J. DUPRAT, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 61, 1987, p. 79-95.
- [5] S. HOWE et T. WEBB, *Quat. Sci. Rev.*, 2, 1983, p. 17-51.
- [6] J. GUIOT, *Quat. Res.*, 28, 1987, p. 100-118.
- [7] G. R. COOPE, in W. H. BERGER et L. D. LABEYRIE éd., *Reidel Publ. Comp.*, Dordrecht, 1987, p. 147-150.
- [8] J. GUIOT, *Climatic Change*, 10, 1987, p. 249-268.
- [9] D.-D. ROUSSEAU, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 59, 1987, p. 293-314.
- [10] J. GUIOT et A. PONS, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, 1986, p. 911-916.
- [11] J. GUIOT, A. PONS, J. L. DE BEAULIEU et M. REILLE, *Nature*, 338, 1989, p. 309-313.

D.-D. R. : U.R.A.-C.N.R.S. n° 157, Centre des Sciences de la Terre, 6, boulevard Gabriel, 21100 Dijon et P.N.E.D.C., Programme national d'Étude de la Dynamique du Climat, thème Paléoclimatologie.